

온실가스 배출권 가격 결정요인과 시사점¹⁾

에너지경제연구원 부연구위원 이 지 웅

(j.lee@keei.re.kr)



1. 서론

우리나라는 2009년 코펜하겐에서 2020년까지 국가 온실가스 배출량을 전망배출량 BAU(Business-As-Usual) 대비 30% 감축이라는 목표를 선언하고, 2011년 7월 해당 감축 목표를 달성하기 위한 세부 부문별·업종별 감축목표를 수립하였다. 그리고 이를 달성하기 위한 다양한 정책수단과 조치를 도입하였는데, 특히 지난 2012년 5월에는 개발도상국으로서 처음으로 온실가스 배출권 거래제를 입법화하였고 3년여의 준비과정을 거쳐 온실가스 배출권거래제가 2015년 1월부터 시행될 예정이다.

배출권 거래제에 포함되는 기업들은 당분간 정해진 규칙에 따라 온실가스 배출권(이하 ‘배출권’)을 무상 할당받게 된다. 자신의 실제 배출량이 할당량을 초과하는 경우 배출권 시장에서 배출권을 구매하여 제출하거나 벌금을 지불해야 한다. 반면, 자신의 배출량이 할당량보다 적은 경우 기업은 남은 배출권을 시장에

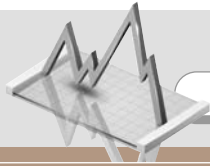
서 판매함으로써 수익을 얻을 수 있다. 따라서 배출권의 가격은 배출권 거래제에 포함되는 기업의 이윤에 영향을 미치게 된다.

그렇다면 배출권 가격은 어떻게 결정이 되는가라는 질문을 던지는 것은 자연스럽다. 이 질문에 대답하기 위하여 본고에서는 기존의 다양한 EU 배출권 가격설정 모형을 검토하고 통계적으로 유의미하다고 판단되는 요인들을 찾아 분류한다. 그리고 우리나라 배출권 시장의 예상되는 형태를 제시한다.

우리는 배출권 가격을 결정하는 요인을 크게 공급과 수요측면에서 살펴보기로 한다. 배출권 가격은 다른 재화처럼 기본적으로 공급과 수요에 의하여 결정되기 때문이다. 공급측면부터 살펴보자. 배출권 시장에서 배출권은 정부가 미리 정한 상한(cap) 내에서 민간으로의 유·무상 할당을 통해 시장에 공급된다. 예를 들면, EU에서는 배출권 거래제(Emissions Trading Scheme, 이하 ETS) 3기(2013~2020년)부터 매년 국가 실행계획(National Implementation

1) 본고는 이지웅, 배출권 가격결정 모형 연구 최신 현황과 시사점, 에너지경제연구원(2014)의 내용을 부분적으로 수정·보완한 것임.

2) http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/cap/allocation/docs/faq_nim_cscf_en.pdf.



Measures)²⁾을 통해 각 국가에서 민간으로 배출권이 할당된다. 우리나라도 매년 정해진 규칙에 따라 정부가 배출권 총량을 결정한다. 따라서 배출권의 공급은 순전히 정부의 정책 및 제도에 의하여 결정된다고 할 수 있다.

수요측면은 좀 더 복잡하다. 배출권의 수요자는 배출권 거래제에 포함된 기업들이며, 각 기업의 수요는 자신의 예상 배출량에 의해 결정된다. 그리고 예상 배출량은 우선 에너지 시장 조건(석유, 가스, 석탄 등의 가격)에 달려있다. 기존 연구에 따르면 에너지 가격은 탄소가격의 가장 중요한 요인으로 알려져 있다. 예를 들면, 석탄 자체 가격은 저렴하나 탄소배출량이 많기 때문에, 배출권 가격까지 고려한다면 석탄 사용은 최적의 선택이 아닐 수 있다. 이를 좀 더 살펴보면 다음과 같다.

배출권 거래제가 도입되기 전에는 발전사의 석탄과 가스 사이 선택은 석탄을 이용한 전력 1단위 발전으로 벌어들이는 이윤을 나타내는 ‘다크 스프레드(dark spread)’와 가스를 이용한 전력 1단위 발전으로 벌어들이는 이윤을 나타내는 ‘스파크 스프레드(spark spread)’의 비교를 통해 이루어졌다. 그런데 배출권 거래제로 인하여 탄소배출 비용이 추가됨에 따라, 이를 고려한 ‘청정 다크 스프레드(clean dark spread)’와 ‘청정 스파크 스프레드(clean spark spread)’를 비교하여 석탄과 가스 사이의 선택이 이루어진다. 즉 단순히 상대적으로 저렴한 연료를 선택하는 것이 아니라, 가격 차가 이산화탄소 배출에 따른 배출권 구입 지출보다 커야 해당 연료를 선택하게 된다.

‘청정 다크 스프레드’와 ‘청정 스파크 스프레드’가 일치하도록 하는 배출권 가격을 ‘전환가격(Switching price)’이라고 하는데, 그 이유는 이 가격보다 높은 수준에서는 석탄에서 가스로 바꾸는 것이 낫고, 아래

수준에서는 석탄 발전이 유리하기 때문이다. 참고로 Kanen(2006)에 따르면, 이 전환가격은 석탄 가격보다는 가스 가격에 더 민감한 것으로 알려져 있다.

온도, 강수량, 바람 등의 날씨 조건 또한 배출권 수요를 결정한다. Mansanet-Bataller et al.(2007)은 날씨 변수의 영향이 통계적으로 유의미함을 확인하였다. 그 외에도 많은 연구가 날씨 변수와 탄소가격 관계를 확인했는데, 특히 온도와 전력수요가 비선형적인 관계에 있음을 판명하였다. 여기서 비선형이란, 온도 수준과 관계없이 온도가 변화함에 따라 전력수요가 변화하는 것이 아니라, 어떤 임계점을 전후로 온도가 상승, 하락했을 때 전력수요가 증가한다는 의미이다. 그리고 이 임계점을 넘는 경우, 냉방수요가 증가하여 전력 수요가 늘게 되고, 이에 따라 발전량이 많아져 이산화탄소 배출이 많아진다. 또한, 비가 많이 오는 우기에는 수력발전 공급이 늘어나 이산화탄소 배출이 감소하며, 바람도 풍력발전 공급을 결정하므로 이산화탄소 배출과 관련이 있다.

이러한 미시변수 이외에도 배출권 수요는 경제성장이나 금융시장의 거시경제 변수들에도 달려있다. 에너지 가격이나 날씨조건이 동일하더라도 경기가 침체 되면 생산 활동이 줄어 에너지에 대한 수요가 감소하므로 이산화탄소 배출이 줄게 된다.

본고의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 정부의 정책 및 제도가 공급에 어떠한 영향을 미치는지 살펴본다. 3절에서는 수요측면의 세 가지 요인 - 에너지 시장 조건, 날씨 조건, 거시경제 조건 - 을 간략히 살펴본다. 4절에서는 배출권 가격 설정 요인을 직접적으로 규명하지는 않았지만, 우리나라 배출권 거래제에 시사점을 줄 수 있는 연구사례를 살펴본다. 바로 미국의 SO₂ 거래권 시장에 관한 것으로, 해당 연구는 배

출권 가격의 통계적 특성을 규명하고 이를 적절히 모형화할 수 있는 방법론을 제시한다. 미국의 SO₂ 시장에 주목하는 이유로 1기 동안 526개 기업이 참여하는 우리나라 배출권 시장은 11,000여개가 넘는 시설(installation)이 참여하고 거래가 활발히 일어나는 EU CO₂ 배출권 시장보다는 참여기업이 몇 백 개에 불과했던 미국의 SO₂ 시장과 유사한 특성을 보일 것으로 예상되기 때문이다. 따라서 배출권 가격 시계열의 통계적 특성이라는 관점에서 미국의 SO₂ 시장에 가까울 것으로 보인다. 마지막 절에서는 주요 결론을 요약하고 시사점을 도출한다.

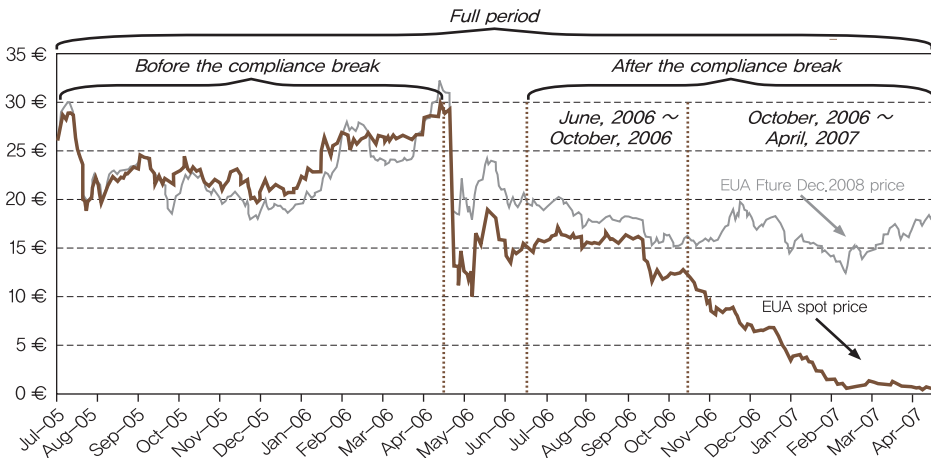
배출권 거래제 하에서 배출권 공급량을 결정할 수 있는 경제주체는 정부뿐이다.³⁾ 정부가 결정한 감축목표에 따라 배출권 총량이 결정되며, 이 중 얼마를 시장에 유통시킬 것인지 역시 정부의 정책적 의지에 따라 결정된다.⁴⁾ 구체적으로 배출권 가격을 미치는 정책적 요인은 크게 두 가지로 볼 수 있다. 첫 번째는 할당된 배출권의 수량, 구체적으로는 실제 배출량과 할당된 배출권의 수량의 차이이며, 두 번째는 다른 기(phase) 사이의 이월(banking) 혹은 차입(borrowing)에 대한 제약 여부이다. 이를 차례로 살펴보기로 한다.

가. 실제 배출량과 할당된 배출권 수량의 차이

2. 공급측면 배출권 가격 결정요인

2006년 4월, EU ETS에서 실제 배출량과 할당된

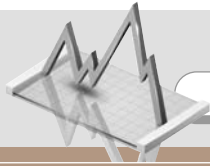
[그림 1] EUA 가격 추세(2005.7.1 ~ 2007.4.30)



자료: Alberola et al.(2008), p. 788.

3) EU 배출권 거래제의 경우, 유럽집행위에 의해 결정되며, 캘리포니아 배출권거래제는 주정부에 의하여 결정됨.

4) UN CDM 사업에서 발행되는 CER(Certified Emissions Reduction)이나 자발적 감축 사업에서 발생하는 VER(Voluntary Emissions Reduction) 등의 오프셋이 시장에 유입될 수 있으나, 얼마나 허용할지는 역시 정부에 의해 결정됨.



배출권 수량의 차이에 따라 배출권 가격이 급격하게 변했다. 당시 EU 집행위는 2005년 실제 배출량을 공식적으로 발표했는데, 이 발표는 배출권 가격에 상당한 영향을 미쳤다(Ellermann and Bucher, 2008). 아래 EU 배출권 거래제의 거래단위인 EUA(EU emission Allowance)의 가격 추세를 보자.

여기서 진한 선은 현물가격을, 옅은 선은 2008년 12월물 선물 가격을 나타낸다. 시계열은 2007년 7월 1일부터 2007년 4월 30일까지이다.

[그림 1]에 나타난 가격 추세를 자세히 살펴보자. 배출권 거래제가 시작한 2005년 1월에 €8에서 시작하였다가, 7월에는 €30까지 상승하였으며 2006년 4월까지 €25 수준을 유지하였다. 그런데 2006년 4월 마지막 주 배출권 가격이 급락하게 된다. 이유는 이때 공식발표한 2005년 실제 배출량이 할당된 배출권의 수보다 현저히 낮았기 때문이다. 즉, 배출권이 시장에 과다공급된 것이다. 이에 따라 배출권(현물) 가격은 이후 4일 동안 약 54% 수준으로 가격이 조정되었고, 2006년 10월까지 €15~20 수준에서 머무른다.

또한 2006년 10월부터 두 가지 가격 신호가 공존하게 된다. 배출권 현물가격은 계속 하락하지만, 2008년 12월물, 즉 2기에 사용할 수 있는 배출권 가격은 €20에서 유지된다. 이는 EU 집행위(EC)가 2기부터는 감축수준을 강화할 것이라는 발표에 따른 것이다. 그리고 2007년 4월 2006년 실제 배출량이 발표되었는데, 역시 할당량보다 작았다는 것이 확인되면서 현물가격은 0으로 수렴하게 된다.

Alberola et al.(2008)과 Chevallier et al.(2009)은 이렇게 정부의 제도나 정책의 변화 혹은 발표에 따른 배출권 가격 변동을 계량경제학적으로 엄밀히 분석하였다. 각각 자세히 알아보기로 한다.

1) 배출량 발표가 배출권 가격에 미치는 영향

Alberola et al.(2008)의 연구부터 살펴보자. 그들은 1기(2005~2007) 동안 가격변화의 추이를 다음의 모형을 통해 분석하였다.

$$p_t = \alpha_i + \beta_i(L)p_t + \chi_i \cdot break_1 + \delta_i \cdot break_2 + \phi_i(L)brent_t + \psi_i(L)ngas_t + \gamma_i(L)coal_t + \eta_i(L)switch_t + \iota_i(L)elec_t + \kappa_i(L)cleandark_t + \lambda_i(L)cleanspark_t + \Theta_i Temp + \mu_i Temp_{ext5} + \nu_i Temp_{ext95} + \epsilon_{i,t}$$

여기서, t 는 시간을 나타내며, i 는 기간 구분을 나타내는 것으로 다음과 같다.

$$i = \begin{cases} full\ period, \\ before\ the\ compliance\ break, \\ after\ the\ compliance\ break, \\ June\ 2006 \sim October\ 2006, \\ October\ 2006 \sim April\ 2007 \end{cases}$$

그리고 p_t 는 1차 차분한 EUA 가격, $break_1$ 은 2006년 4월 구조적 변화 이후를 나타내는 더미변수, $break_2$ 는 2006년 10월 이후를 나타내는 더미변수이다. 변수 $brent_t$, $ngas_t$, $coal_t$ 는 각각 브렌트유, 가스, 석탄 가격 시계열을 나타내며, $brent_t$, $elec_t$ 은 스위치 가격, 전력 가격 시계열이며, 변수 $cleandark_t$, $cleanspark_t$ 는 각각 청정 다크 스프레드, 청정 스파크 스프레드 시계열이다.

$Temp$ 는 Tendances Carbone에 의해 발행되는 유럽온도지수, $Temp_{ext5}$, $Temp_{ext95}$ 는 이 지수의 5% 이하 및 95% 이상을 나타내는 더미변수이다.

또한 온도 영향과 관련된 영향을 추가적으로 고려하기 위하여 다음과 같은 모형을 고려하였다.

$$\begin{aligned}
 p_t = & \alpha_i + \beta_i(L)p_t + \chi_i \cdot break_1 + \delta_i \cdot break_2 \\
 & + \phi_i(L)brent_t + \psi_i(L)ngas_t + \gamma_i(L)coal_t \\
 & + \eta_i(L)switch_t + \iota_i(L)elec_t \\
 & + \kappa_i(L)cleandark_t + \lambda_i(L)cleanspark_t \\
 & + \rho_i Jul05 + \theta_i Win06 + \vartheta_i Jul06 + \rho_i Sepoct06 + \sigma_i Win07 \\
 & + \epsilon_{i,t}
 \end{aligned}$$

여기서 *Jul05*, *Win06*, *Jul06*, *Sepoct06*, *win07*는 모두 교호변수(interaction variable)로서 이상고온(2005년 7월, 2006년 7월, 2006년 9, 10월)과 이상저온(2006년 6월, 2007년 겨울) 있었던 시기가 배출권 가격에 어떠한 영향을 미쳤는지 잡아내기 위해 도입되었다. 예를 들면, *Jul05*는 2005년 7월을 나타내는 두 개의 변수 - 터미변수와 해당기간 온도와 유럽 온도 지수의 평균값과의 차 - 의 곱이다. 이 교호변수는 예상하지 못했던 온도변화로 볼 수 있다.

이 두 모형을 추정하여 얻어낸 결과는 다음과 같다.

첫째, 2005~2007년 탄소가격은 2회의 구조적 변화가 통계적으로 확인되었다. [그림 1]에서 확연히 드러나는 것처럼 첫 번째 구조적 변화는 2005년 배출량을 발표한 2006년 4월이다. 두 번째 변화는 2006년 10월로서 유럽집행위가 ETS 2기(2008~2012년)에 관한 정책을 발표했을 때이다.

두 번째 결론은 온도에 관한 것으로, 온도의 수준 자체는 배출권 가격에 유의한 영향을 미치지 못하는 것으로 확인되었다. 온도의 절대적 수준보다는, 예상하지 못했던 온도변화가 더 중요한 영향을 미치는 것으로 판명되었다. 온도가 배출권 가격에 미치는 영향은 아래서 추가로 논의하기로 한다.

2) 배출량 발표가 경제주체의 위험 회피에 미치는 영향

EU ETS 초기에 대부분의 거래는 투기적 동기에

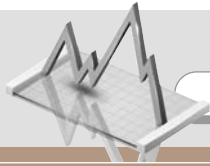
따라 이루어질 것으로 예상되었다. 따라서 EU 집행위의 정책 변경이나 발표에 따라 투자자들의 행태가 변할 수 있으며, 특히 투자자들의 위험회피에 영향을 미칠 수 있다. 새로 생긴 시장에서 투자자들의 위험회피에 대한 이해가 중요한 이유는 다음과 같다.

첫째, EU ETS에서 거래량이 2005년 2.6억 톤에서 2007년 14.4억 톤으로 증가하였다. 이러한 거래량의 급격한 증가는 배출권 시장이라는 새로운 형태에 대한 투자자들의 이해가 증진되고 있음을 의미한다. 시간이 지남에 따라 배출권 시장 제도에 관한 정보가 확산되며, 이에 따라 투자자들이 자신들의 위험회피 정도가 변화하게 되는 것이다.

둘째, EU ETS 1기 배출권 현물가격은 높은 변동성을 보였다. 규정상 매년 3월 말 이전 년도 배출량에 해당하는 배출권을 제출하여야 하는데, 이에 따라 이 시기를 전후하여 투자자들의 선호와 위험 헤징 전략이 변화하게 된다. 따라서 높은 변동성은 이러한 규정과 관련이 있다.

셋째, 배출권은 일반적인 금융상품과 많은 부분에서 성격을 달리한다. 배출권이 없어도 기업은 생산활동을 지속할 수 있고, 다만 1년에 한번 배출권이 필요하다. 따라서 많은 기업들이 동일한 시기에 배출권 구매를 희망할 경우 유동성 함정이 발생할 가능성이 있다. 또한 정부의 정책에 따라 지금 기의 배출권이 다음 기에 사용이 불가능하게 되는, 즉 배출권 이월이 불가할 수도 있다. 이러한 배출권의 특성으로 인해 배출권 시장에서의 투자자들의 위험회피 성향은 다른 금융상품 시장에서의 차이가 나게 된다.

이러한 문제의식을 바탕으로 Chevallier et al.(2009)는 배출권 옵션 가격 자료를 이용하여 2007년 4월에 있었던 2006년 배출량 발표가 투자자들의



위험회피에 유의미한 영향을 주었는지 살펴보았다. 이를 위해 Ait-Sahalia and Lo(2000)의 방법론을 이용하여 절대 위험회피도(Absolute Risk Aversion)를 추정하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, EU 집행위가 2007년 4월 발표한 2006년 배출량에 따르면 실제 배출량이 할당량보다 3천만 톤 낮았는데, 이 발표 이후 투자자들의 위험회피 수준에서 상당한 변화가 있었음을 통계적으로 확인할 수 있었다. 둘째, 2008년 12월과 2009년 12월 만기인 옵션의 변동성이 2007년 4월 이후 감소하였다. 셋째, 배출권 가격이 증가하면 변동성도 높아지는 것으로 확인되었는데, 주식시장에서 흔히 관찰되는 레버리지 효과와 정확히 상반되는 것으로 배출권 시장의 특성을 보여준다. 넷째, 마지막으로, 고려된 자료의 기간 동안 탄소시장에서 위험회피 정도가 주식시장에서의 위험회피 정도보다 높았다.

나. 이월과 차입에 대한 제약

실제 배출량의 공표 외에 배출권 가격에 영향을 미칠 수 있는 다른 중요한 제도적 요인은 다른 기(phase) 사이에 이월(banking)과 차입(borrowing)에 대한 제약 여부이다. 이월은 지금 기에 남은 배출권을 다음 기에 사용할 수 있는 것이고, 차입은 다음 기에 할당받을 배출권을 미리 지금 기에 사용하는 것을 의미한다.

EU ETS의 경우 1기(Phase 1)는 2005~2007년, 2기는 2008~2012년, 3기는 2013~2020년이다.⁵⁾

EU-ETS에서는 1기와 2기 사이에 이월과 차입 모두 허용되지 않았고, 2기와 3기 사이에는 이월은 가능하지만 차입은 허용되지 않았다.⁶⁾ 이에 따라 1기의 배출권 여유분은 2008년 1월 1일부로 아무런 가치가 없게 되었다. EU 집행위가 1기와 2기를 철저히 단절한 이유는 1기는 배출권 거래제 시험 기간이었던 만큼 1기에서 드러난 시장의 문제점이 2기로 전이되는 것을 막기 위해서였다(Alberloa and Chevallier, 2009).

1기에서 2기로의 이월 금지라는 EU 집행위의 지침 발표는 2006년 10월에 이루어졌다. 이 발표에 따라 1기 말(2007년 12월)까지 두 가지 가격 신호가 공존하게 된다. 첫 번째 가격 신호는 1기에만 유효한 배출권 현물가격인데, 이 가격은 0으로 수렴한다. 두 번째 가격 신호는 2기에 쓸 수 있는 선물(futures) 가격으로, 2기에는 배출량 규제가 강화되어 배출권이 시장에서 부족할 것이라는 예상 때문에 €20 선에서 머무르게 된다.

이월 금지 정책의 영향을 모형화한 대표적인 연구로는 Daskalakis et al.(2009)가 있다. 이를 자세히 살펴보기로 하자. Daskalakis et al.(2009)은 EU ETS의 대표적 거래소인 Powernext, Nord Pool, European Climate Exchange의 일일 가격자료(2005년 10월 25일~2007년 12월 28일)를 사용하여 배출권 현·선물가격 결정 모형을 제시하고 실증적으로 확인하였다.

현물가격 분석 결과, 현물가격은 급침 분포(leptokurtic distribution)를 따르며, 가격 시계열은 비정상(nonstationary)적이며 점프를 가지고 있

5) 우리나라의 경우 '기'에 해당하는 것은 '계획기간'으로, 1차 계획기간은 2015~2017년, 2차 계획기간은 2018~2020년임.

6) 우리나라는 계획기간 사이의 이월은 자유롭고, 차입은 주무관청 승인이 있으면 일부 허용됨.

는 것으로 확인되었다.

따라서 현물가격은 단순한 브라운 운동(Brownian motion)이 아닌, 점프가 포함된 레비 과정(Levy process)으로 모형화하는 것이 적합하며, 특히 다음과 같은 형태가 실제 자료를 잘 설명한다는 것을 확인하였다.

$$dS_t = (\mu - \lambda\mu_j)S_t dt + \sigma S_t dW_t + (y-1)S_t dq_t$$

여기서 S_t 는 EUA 현물가격, W_t 는 표준 브라운 운동, q_t 는 포아송 과정(Poisson Process)으로 다음을 만족시킨다.

$$\Pr\{dq_t = 1\} = \lambda dt, \Pr\{dq_t = 0\} = 1 - \lambda dt$$

또한 y 는 점프 사이즈를 나타내는 확률변수로서 $N(\mu_j, \sigma_j^2)$ 분포를 따른다.

이렇게 적절한 현물가격 모형을 찾은 후, 기내(intra-phase) EUA 선물 가격과 기간(inter-phase) EUA 선물 가격을 분석하였다. 그 결과, 기내(inter-phase) 선물 계약은 표준적인 영(零)의 편의수익(zero convenience yield)을 가진 보유이동 모형(cost-of carry model)을 통해 적절히 모형화 될 수 있는 것으로 판명되었다. 그러나 기내(intra-phase) 선물 계약은 확률적 평균회귀 편의수익(stochastic mean-reverting convenience yield)을 가진 보유이동 모형으로 모형화하는 것이 우수함을 확인하였다.

Daskalakis et al.(2009)는 이러한 추론을 통해 기내·기간 선물 계약 가격이 현저하게 차이가 나는 것을 확인하였고, 이러한 차이는 이월 금지라는 제약 때문에 발생한 것이라고 결론지었다. 또한, 배출권 현

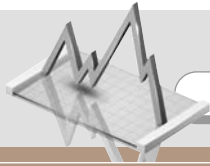
물 가격이 보여주는 높은 변동성과 비연속성과 서로 다른 기내(intra-phase)와 기간(inter-phase) 선물의 가격결정 메커니즘은 관련 파생상품을 다루는데 주의를 요구한다고 강조하였다. 특히 기간(inter-phase) 선물 가격결정 모형에서 등장하는 확률적 편의이익은 기업이나 투자자로 하여금 추가적인 불확실성에 직면하게 하여 헤징 비용을 증가시킨다고 보았다. 따라서 정책입안자는 이월 제약을 없애는 것이 가장 효율적인 이산화탄소 감축이라는 배출권 거래제의 본래 목적을 달성하는데 도움이 될 것이라고 제안하고 있다.

3. 수요측면 배출권 가격 결정요인

앞 절에서는 배출권 가격에 영향을 미치는 요인을 공급측면에서 살펴보았다. 이번 절에서는 동전의 뒷면이라고 할 수 있는 수요측면에서 살펴보기로 한다. 서론에서 언급한 것처럼 생산활동을 영위하는 기업들의 배출권 수요에 영향을 미치는 요인으로서는 에너지 가격, 날씨 조건 그리고 거시경제변수가 있다. 이들을 차례대로 살펴본다.

가. 에너지 가격의 영향

Mansanet-Bataller et al.(2007)과 Alberola et al.(2008)는 에너지 시장과 배출권 가격의 관계를 계량경제학적으로 분석하였다. Mansanet-Bataller et al.(2007)는 ETS 1기의 배출권 현물·선물 가격 자료를 이용하여 배출권 가격 변화는 화석연료 사용과 연관이 있음을 통계적으로 확인하였다. Alberola



et al.(2008)는 더 확장된 자료를 이용하여 에너지 가격과 탄소가격 사이의 관계는 고정적이지 않으며, 기간 그리고 주요 정책의 변화에 의존함을 확인하였다.

Bunn and Fezzi(2008)는 구조적 공적분 벡터 오차수정모형(Structural Cointegrated Vector Error Correction Model)을 이용하여 영국의 전기 가격, 가스 가격 그리고 배출권 가격의 상호 관계를 분석하였다. 특히 배출권 가격이 전력 가격으로 반영되는 과정과 가스 가격 변화가 전력 및 배출권 가격에 미치는 충격을 유도하였다. 또한, Hintermann(2010)은 효율적 시장 가설 하에서 탄소시장 가격의 모형을 도출하였으며, 이를 이용하여 실제 배출권 가격의 변화가 한계감축비용(marginal abatement cost)에 의해 얼마나 설명될 수 있는지 규명하였다. 이들 연구를 좀 더 자세히 논의한다.

1) 에너지 가격과 배출권 가격간의 상관관계

Mansanet-Bataller et al.(2007)는 배출권 가격과 에너지 가격 간의 관계를 통계적으로 분석한 최초의 연구이다. 그들은 2005년 자료를 이용하여 다음과 같이 에너지 가격과 탄소가격 사이의 상관계수를 찾아내었다.

여기서 하첨자 c, b, g, cl 는 각각 탄소, 원유(Brent), 가스, 석탄을 나타내며, $r_{c,t} = \ln(P_{c,t}/P_{c,t-1})$ 로 정의되며, $t-1$ 기 대비 t 기의 배출권 가격 변화를 나타낸다. $r_{b,t}, r_{g,t}, r_{cl,t}$ 도 마찬가지로 정의된다.

〈표 1〉에서 살펴보면, 같은 기의 에너지 가격 변화보다(Panel A), 1기 이전의 가격 변화와의 상관계수가 높다는(Panel B) 것을 알 수 있다.

이에 Mansanet-Bataller et al.(2007)는 앞에서 논의한 에너지 변수와 날씨 변수를 모두 포함시킨 다음과 같은 모형을 고려하였다.

$$r_{c,t} = \alpha + \delta(L)r_{b,t} + \beta(L)r_{g,t} + \phi(L)r_{cl,t} + \eta D_{\max,t} + \psi D_{\min,t} + \gamma Ratio_t + \epsilon_t$$

〈표 1〉 에너지 가격과 배출권 가격간의 상관계수

Panel A	$r_{c,t}$	$r_{b,t}$	$r_{g,t}$	$r_{cl,t}$
$r_{c,t}$	1.000*			
$r_{b,t}$	0.093	1.000*		
$r_{g,t}$	0.195*	0.139	1.000*	
$r_{cl,t}$	0.055	0.024	-0.073	1.000*
Panel B	$r_{c,t}$	$r_{b,t}$	$r_{g,t}$	$r_{cl,t}$
$r_{c,t-1}$	0.202*	-0.002	0.030	0.140*
$r_{b,t-1}$	0.268*	-0.067	0.042	0.065
$r_{g,t-1}$	0.216*	0.033	0.247*	0.118
$r_{cl,t-1}$	0.010	-0.030	-0.103	0.102

주: *은 5% 수준에서 유의함을 의미

자료: Mansanet-Bataller et al.(2007), p. 80.

$$r_{c,t} = \alpha + \delta(L)r_{b,t} + \beta(L)r_{g,t} + \phi(L)r_{d,t} + \eta D_{\max,t} + \psi D_{\min,t} + \gamma Ratio_t + \epsilon_t$$

여기서 $r_{b,t}$, $r_{g,t}$, $r_{d,t}$ 는 각각 배출권, 원유, 가스, 석탄의 가격 변화 시계열이다. $D_{\max,t}$, $D_{\min,t}$ 는 각각 배출권 가격이 극단적으로 증가할 때, 혹은 감소할 때를 표시하는 더미변수이다. $Ratio_t$ 는 가스가격 변화와 석탄가격 변화의 비율로서, 이는 석탄과 가스 사이의 전환 가능성을 포착하기 위하여 포함되었다.

위 식을 추정하여 얻은 결과는 다음과 같다. 첫째, t 기의 에너지 가격 변수는 t 기의 배출권 가격 변화에 영향을 미치지 않았다. 단, $t-1$ 기의 가스와 원유 가격 변수는 유의미한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 계수가 모두 양(+)이었는데, 이는 가스나 원유가격이 상승하면 대체제로 석탄을 사용하게 되고, 따라서 이산화탄소 배출이 늘어나 배출권 수요가 증가, 가격 상승으로 이어질 것이라는 자연스러운 예상과 일치한다. 다만, 석탄가격 변수와 Ratio는 유의미하지 않는 것으로 판명되었다. 둘째, 배출권 가격의 극단적인 변화를 나타내는 더미 변수는 유의미한 것으로 판명되었는데, 이는 극단적인 가격 변화가 가격추이를 설명하는데 도움이 됨을 의미한다.

2) 에너지 가격과 배출권 가격의 상호 영향

Bunn and Fezzi(2008)은 영국의 2005년 4월 1일부터 2006년 6월 30일까지의 일일 자료를 이용하여 전력가격, 가스가격과 탄소가격의 상호관계를 규명하였다. 이를 위해 다음과 같은 구조적 공적분 벡터 오차수정모형(Structural Co-integrated Vector Error Correction Model)을 추정하였다.

$$\Delta y_t = \omega \Delta z_t' + \alpha \beta y_{t-1} + \Gamma_1 \Delta x_{t-1} + \dots + \Gamma_{k-1} \Delta x_{t-k+1} + C d_t + u_t$$

여기서, $y_t = [p_{elec,t}, p_{gas,t}, p_{carbon,t}]'$, $z_t' = [t_{hot,t}, t_{cold,t}]$ 이며, d_t 는 계절성을 잡아내기 위한 기타 더미변수를 포함하고 있는 확정요인 벡터이다.

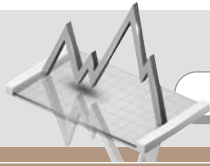
이 모형에서 온도와 확정요인은 전력, 가스, 배출권 가격의 단기 동학에 영향을 미치며, 가격은 조정계수 α 벡터 $\beta' y_{t-1}$ 를 따라 균형벡터인 α 로 회귀하는 경향이 있다(Johansen, 1991)

Hannan-Quinn 기준에 의하여 시차(time lag)는 1로 선택되었고($k = 0$), 요한슨 검증에 의해 한 개의 공적분 벡터가 존재함을 확인하였다. 분석 결과, 배출권 가격은 가스가격 변화에 신속히 반응하며, 배출권 가격이 전력 가격으로 반영되는 데에는 며칠이 걸렸다. 장기적으로 배출권 가격의 1% 충격은 평균적으로 전력 가격의 0.32% 변화에 해당하는 충격을 주는 것으로 확인되었다. 또한 배출권 가격과 가스가격이 전력 가격에 영향을 미치며, 동시에 가스가격은 배출권 가격에 상당히 영향을 미치는 것으로 판명되었다.

다만, Bunn and Fezzi(2008)는 에너지 가격 변수와 배출권 가격의 상호관계를 최초로 분석한 연구이지만, 분석 대상 자료가 대부분 유럽집행위의 2005년 배출량 발표 전인 2006년 4월 이전인 만큼 이 결과는 해당 시기에만 유효한 것일 수 있음에 유의할 필요가 있다.

나. 온도와 날씨 변화

배출권 가격은 앞서 논의한 에너지 가격 변수 이외에도, 온도, 강수량, 바람 등의 날씨 조건에 의해 영향을 받는다(Mansanet-Bataller et al.(2007),



Alberola et al.(2009), Hintermann(2010)). 예를 들어, 온도가 낮은 추운 날씨에는 난방수요가 증가한다. 특히 온도가 평균을 이탈하여 현저히 낮은 경우, 예상치 못했던 온도변화는 배출권 가격 변화에 상당한 영향을 미친다(Alberola et al., 2009). 또한, 강수량이나 풍속, 일조시간은 이산화탄소를 배출하지 않는 수력, 풍속, 태양광 발전량에 영향을 미치게 된다. 따라서 이러한 날씨 요인들이 이산화탄소 배출량을 변화시키고 차례로 배출권 수요를 변화시켜 배출권 가격에 영향을 미치게 된다. 그런데 온도변화는 어떤 임계치를 넘는 경우에만 배출량을 변화시켜 배출권 가격에 영향을 미치기 때문에, 이러한 비선형성(Non-linearity)을 반드시 고려해야 한다.

Mansanet-Bataller et al.(2007)는 1절에서 살펴본 것처럼 에너지 가격과 배출권 가격 사이의 상관관계를 살펴보았고, 아울러 날씨와의 관계도 살펴보았다.

〈표 2〉를 읽는 방법은 다음과 같다. 패널 A를 보자. 첫 번째 열은 저온이 연속적으로 지속된 날짜를 의미한다. 예를 들어, 3d는 저온이 3일 동안 지속되었을

을 의미한다. 그 다음 세 열은 온도가 오분위수(quintile) 중 가장 낮은 범위에 있는 날 배출권 가격 변화(r_c)에 대한 자료이며, 다음 두 열은 나머지 관찰치에 관한 자료이다. 다음 K-W 검정은 네 번째 중앙값과 여섯 번째 중앙값이 서로 다른지 검정하는 것이며, χ^2 값은 온도가 첫 번째 오분위수에 포함되는 날 배출권 가격이 양(+) 혹은 음(-)의 변화를 보인 빈도와 나머지 날의 빈도가 다른지 검정하는 것이다.

패널 B는 온도가 높은 경우이며, 패널 C와 D는 동일한 분석을 강수량에 대하여 실시하였다.

〈표 2〉에서 온도 변화는 배출권 가격과 관련이 있는 것으로, 강수량의 영향은 그리 크지 않음을 시사한다. 이에 Mansanet-Bataller et al.(2007)는 1절에서 논의했던 모형에 온도 변수를 포함시켜 추정을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 첫째, 1기 이전 원유와 가스 가격 변화는 여전히 유의미하며, 둘째, 우기와 건기는 탄소가격에 유의미한 영향을 주지 않았으며, 셋째, 극단적인 기온변화. 즉, 혹한이나 혹서기는 배출권 가격에 영향을 미치는 것으로 판명되었다.

〈표 2〉 날씨와 배출권 가격간의 상관계수

Panel A: Low Temperatures

$r_c > 0$ and first quintile			Remaining observation		Test	
Num. Obs	% $r > 0$ in first quintile	Median	Num. Obs	Median	K-W Value	χ^2 Value
5d 18	64.28%	1.88%	215	0.26%	14.5816*	0.5950
4d 21	63.63%	2.02%	212	0.22%	16.6702*	0.4077
3d 23	60.52%	2.02%	210	0.22%	17.6958*	0.0000
2d 26	61.90%	1.52%	207	0.19%	15.9548*	0.0808
1d 29	64.44%	1.30%	204	0.18%	16.7000*	0.6462



Panel B: High Temperatures

$r_{\varepsilon} > 0$ and last quintile			Remaining observation		Test	
Num. Obs	% $r > 0$ in last quintile	Median	Num. Obs	Median	K-W Value	χ^2 Value
5d 13	72.22%	0.57%	220	0.39%	2.5756	5.736**
4d 15	71.42%	1.02%	218	0.36%	4.7267**	4.9847**
3d 18	72%	1.93%	215	0.27%	8.5658*	5.5203**
2d 20	64.51%	1.77%	213	0.27%	8.6158*	0.6700
1d 27	65.85%	1.86%	206	0.18%	13.299*	1.1928

Panel C: Low rainfall

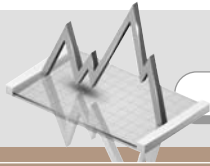
$r_{\varepsilon} > 0$ and first quintile			Remaining observation		Test	
Num. Obs	% $r > 0$ in first quintile	Median	Num. Obs	Median	K-W Value	χ^2 Value
5d 5	35.71%	0.64%	228	0.42%	0.2879	25.7415*
4d 9	47.36%	0.64%	224	0.39%	1.7729	7.2332**
3d 15	51.74%	0.87%	218	0.31%	5.9508**	3.2342
2d 25	58.13%	0.82%	208	0.18%	7.3789*	0.2362
1d 38	57.57%	1.00%	195	0.12%	17.9394*	0.3616

Panel D: High rainfall

$r_{\varepsilon} < 0$ and last quintile			Remaining observation		Test	
Num. Obs	% $r < 0$ in last quintile	Median	Num. Obs	Median	K-W Value	χ^2 Value
5d 0	-	-	233	-	-	-
4d 1	33.33%	-10.67%	232	0.42%	2.8727	1.1819
3d 2	28.57%	-8.17%	231	0.42%	5.3724**	4.2649**
2d 7	28.88%	-1.59%	226	0.48%	10.8297*	0.0029
1d 17	36.17%	-1.59%	216	0.59%	22.1720*	0.2545

주: *(**)는 1%(5%) 수준에서 유의함을 나타냄.

자료: Mansanet-Bataller et al.(2007), pp. 84~85.



다. 거시경제 변수

Alberola et al.(2008, 2009)는 처음으로 2005~2007년 EU 배출권 가격을 제조업의 변화와 대외 경제상황으로 설명하려는 시도를 하였다. 직관적으로 볼 때 생산량이 증가할수록 배출되는 이산화탄소는 증가하며, 따라서 보다 많은 배출권이 필요하다. 이때 모든 조건이 동일하다면(Ceteris Paribus), 배출권 가격은 증가하게 된다. 또한 이들 연구는 할당된 배출권의 약 80%를 차지하는 발전, 제지, 철강부분의 경제활동 변화가 배출권 가격을 결정하는 주요 원인임을 밝혀냈다.

한편, Declercq et al.(2011)은 2008~2009년 경제침체가 유럽 발전분야 이산화탄소 배출량에 미친 영향을 조사하였다. 전력수요, 탄소가격, 연료가격에 대한 가상적(counterfactual) 시나리오를 바탕으로, 발전분야에서 1억 5천만 톤의 배출량 감축은 경기침체에서 기인한 것이라는 것을 보였다.

그 외에도 배출권 시장과 거시, 금융시장의 다양한 변수와의 관계에 대한 연구가 있다. Oberndorfer(2009)는 배출권 가격 변화와 주요 유럽 전력회사 주식 수익률 사이에 양(+)의 상관관계에 있다는 것을 규명하였다. 이 상관관계는 2006년 초반 배출권 시장에 충격이 있었던 시기에 특별히 강했으며, 전력회사의 본사가 위치한 나라에 따라 달랐다.

최근 연구에 따르면, 거시경제 변수가 가장 명백한 배출권 가격 결정요인이지만, 그 메커니즘에 대한 이해는 아직 충분치 않다. 다만 배출권 가격의 변동성과 거시 경제의 경기 변동성과의 관련성을 분석한 Chevallier(2011)에 따르면, 배출권 가격은 경기 변동에 순응적(procyclical)으로 움직인다.

4. 미국 SO₂ 배출권 시장 및 가격 특성

EU ETS 등 탄소 배출권 거래제의 기본적인 형태는 미국에서 1995년부터 실시한 SO₂ 배출권 거래제에서 가져왔다. 비록 규제 대상 가스는 다르지만, 부정적 외부효과를 가진 환경오염 물질을 전통적인 명령-조정(Command and Control) 방식이 아니라 시장 기반 방식으로 감축한다는 점에서 두 제도의 경제학적 구조는 사실상 동일하다. 따라서 미국 SO₂ 배출권 시장과 가격을 이해하는 것은 탄소 배출권 가격을 이해하는데 유용할 것으로 예상되는데, 미국 SO₂ 배출권 시장의 구조적 특성을 간략히 알아본 후 SO₂ 배출권 가격과 EUA 가격을 비교한 연구를 살펴본다.

가. 미국 SO₂ 배출권 시장의 특성

미국에서는 1980년대부터 산성비 문제에 대한 국민적 관심이 고조되었다. 이에 산성비를 유발하는 주요 물질인 SO₂를 규제하기 위한 방안으로 1990년 신대기정화법(Clean Air Act Amendments)이 통과되었는데, 해당 법은 발전회사의 SO₂배출을 1980년 기준 50% 이상 감축하는 것을 목표로 설정하고, 이를 위한 수단으로 상한설정 거래제 형태의 SO₂ 배출권 거래제를 도입하였다.

SO₂ 배출권거래제는 2단계로 나뉘어 시행되었다. 1단계(1995~1999)는 연간 3.6백만 톤의 SO₂ 배출 저감을 목표로 110개의 대규모 발전소가 포함되었으며, 2단계(2000년 이후)는 연간 SO₂ 배출이 8.95백만 톤을 초과하지 않으면서 추가적으로 연간 5백만 톤을 저감하는 것을 목표로 800여개의 발전소를 포함시켰다.

배출한도는 1980년 2천6백만 SO_2 톤 배출량을 2010년까지 연간 16백만 SO_2 톤으로 감축한다는 국가 목표에 따라 결정되었다. 1단계에는 1995년 7.1백만 톤, 1996년 7백만 톤을 감축하고, 1997~1999년에는 매년 6백만 톤씩 감축하도록 설정되었다. 2단계에는 2000~2009년까지 모든 참여자들의 총배출량을 9.48백만 톤으로 제한하였다.

미준수시 벌칙은 초기에는 배출권 초과 단위당 2,000달러, 이후부터는 CPI(소비자물가지수)로 할증되며, 아울러 다음해에 배출권 할당시 자동으로 공제된다.

배출권 거래제 규제를 받는 대상은 발전회사이지만, 배출권 거래는 누구라도 참여할 수 있도록 허용하였다. 거래량에는 제한을 두지 않았으며, 배출권을 다음 연도에도 쓸 수 있는 이월은 가능하지만, 배출권을 미리 사용하는 차입은 허용되지 않았다.

민간부문 배출권 거래활동을 살펴보면 아래 <표 3>과 같다.

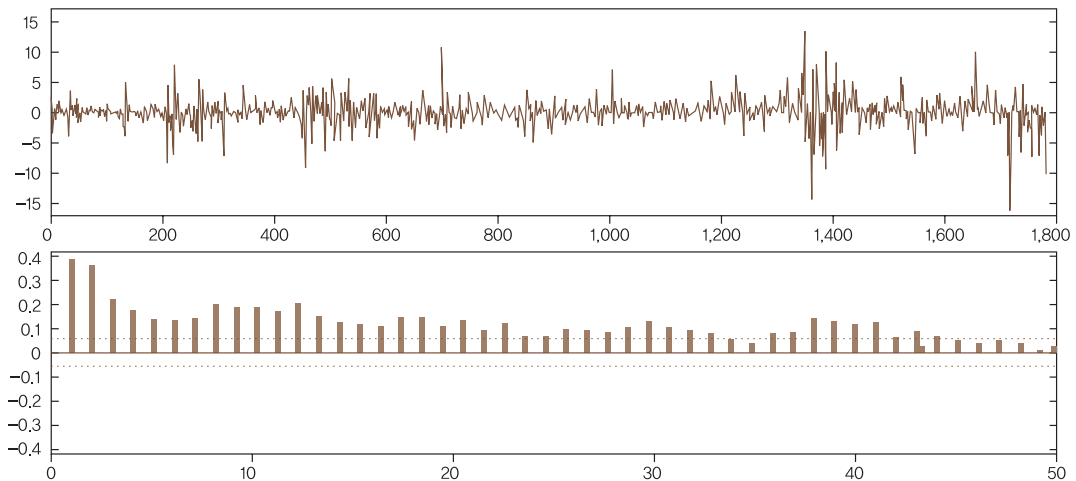
<표 3> SO_2 배출권 거래활동 실적

연도	거래횟수	거래량(백만톤)
1994	215	9.2
1995	613	16.7
1996	1,074	8.2
1997	1,429	15.2
1998	1,584	13.5

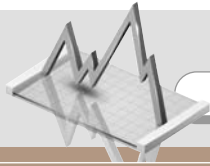
자료: US EPA, <http://www.epa.gov/docs/acidrain/ats/cumchart.html>

SO_2 배출권 프로그램은 성공적인 것으로 평가받고 있다. 1단계 1996년도에 포함된 발전설비는 총 8.3백만 톤을 할당받았으나 당해 연도에 5.4백만 SO_2 톤만

[그림 2] SO_2 배출권 일일 수익률(위)과 0-수익률을 제외한 자기상관함수



자료: Alberola et al, (2008), p. 788.



을 배출, 배출한도 대비 약 35%를 감축하였다. 1989년과 1995년 사이 미국 서부지역 황농도는 약 30% 감소하였으며, 전국적으로 대기 중 SO_2 농도는 1994년과 1995년 동안 약 17% 감소한 것으로 나타났다.⁷⁾

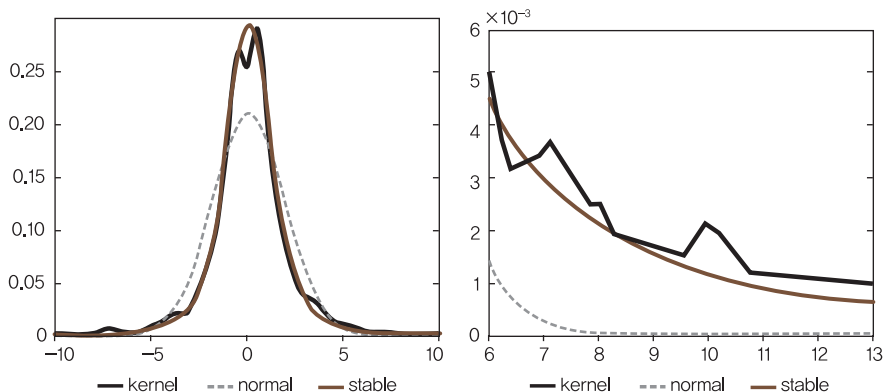
나. 미국 SO_2 배출권 가격 모형

Paolella and Taschini(2008)은 미국에서 실시된 SO_2 배출권 시장과 유럽 배출권 거래제 시장을 비교하였다. [그림 2]와 같이 미국 SO_2 시장의 1999년

1월 4일부터 2006년 5월 16일까지 SO_2 배출권 수익률을 보여준다.

위 그림에서 드러나듯이, SO_2 배출권 일일 수익률은 주식시장에서 일반적으로 드러나는 특성인 변동성 군집(volatility clustering)과 두꺼운 꼬리(fat tail)를 보여준다. 두꺼운 꼬리를 통계적으로 식별하기 위하여 0-수익률을 제외한 자료를 이용하여 핵밀도함수(kernel density)를 추정하면, 정규분포보다는 안정적 분포(stable distribution)에 보다 적합함을 확인할 수 있다. 즉, 두꺼운 꼬리 현상이 나타난다([그림 3] 참조).

[그림 3] 핵밀도 함수 추정(좌)과 추정한 밀도함수의 오른쪽 꼬리(우)



자료: Alberola et al. (2008), p. 788.

SO_2 배출권 일일 수익률이 두꺼운 꼬리와 변동성 군집이라는 특성을 보여준다는 점에서 일반적인 주식의 일일 수익률과 유사하다고 할 수 있다.

그러나 SO_2 배출권 시장의 유동성이 매우 낮다는

점에서 일반적인 주식 시장과 결정적으로 차이가 난다. 유동성이 낮다는 점은 배출권의 거래가 빈번하지 않다는 것을 의미하고, 이는 0의 수익률이 빈번히 관찰된다는 점에서 확인할 수 있다. SO_2 시장의 1999년

7) <http://www.epa.gov/docs/acidrain/effects/tradefx.htm>.

1월 4일부터 2006년 5월 16일까지 일일 자료에 따르면 총 1,780개의 관찰치 중 약 29%가 0의 가격 변동을 보였다.

이렇게 배출권의 거래가 드문 이유는 배출권이 없어도 각 기업은 생산 활동을 하는데 지장이 없는, 배출권의 고유 특성 때문이다. 즉, 배출권을 일일 거래할 필요 없이 배출권 제출 기한에만 배출량에 맞게 확보하면 되기 때문이다. 다만, 모든 기업이 이렇게 행동을 하는 경우 배출권 제출 기한을 전후하여 시장에서 스퀴즈(squeeze)가 일어날 수 있다.

또한 SO₂ 규제를 받는 사업장은 수 백여 개의 에너지 사업자에 불과하여, 시장참여자가 매우 작았던 점도 다른 이유라고 할 수 있다. 그리고 복수의 사업자가 동일한 모(母)회사에 속하는 경우가 있었는데, 이들 사업자 사이에는 내부적으로 거래가 이루어졌기 때문이다.

Paolella and Taschini(2008)는 이렇게 SO₂ 배출권 수익률의 통계적 특성을 규명한 후, 이를 모형화하였다. 변동성 군집, 두꺼운 꼬리, 그리고 빈번한 0-수익률을 어떻게 반영하였는지 단계적으로 살펴보자.

변동성 군집이 있을 때 일반적으로 사용하는 GARCH 모형은 다음과 같다.

$$r_t = \mu + \sigma_t \epsilon_t, \quad \epsilon_t \sim f(\cdot)$$

$$\sigma_t^d = \theta_0 + \sum_{i=1}^r \theta_i |r_{t-i} - \mu_{t-i}|^d + \sum_{j=1}^s \phi_j \sigma_{t-j}^d, \quad d > 0.$$

$d=2$ 이고 f 가 표준정규밀도함수이면 표준 GARCH인 경우이다. 또한, t -GARCH는 $d=2$ 이고 f 가 t -분포 밀도함수인 경우이며, 안정적 GARCH는 $d=1$ 이고 f 가 안정적 분포의 밀도함수인 경우이다. 따라서 안정

적 GARCH를 이용하면 변동성 군집과 두꺼운 꼬리를 보여주는 자료를 모형화할 수 있다.

그러나 이 경우 빈번한 0-수익률을 잡아낼 수 없는데, 이를 다루기 위하여 Paolella and Taschini(2008)는 밀도함수 f 가 혼합정규분포(mixed normal distribution)의 밀도함수라고 가정하였다. 특히 혼합정규분포의 구성원 중 한 분포는 평균이 0이고 분산이 매우 작다고 가정함으로써, 빈번한 0-수익률이라는 특성을 잡아내었다.

이렇게 오차항이 혼합된 정규분포를 따르는 경우, 이를 MixN- GARCH 라고 부르며, 구체적으로 다음과 같이 주어진다.

$$\epsilon_t | \mathcal{I}_{t-1} \sim MN(\omega, \mu, \sigma_t^2)$$

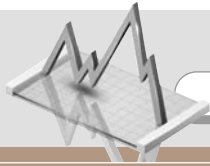
$$\sigma_t^{(2)} = \gamma_0 + \sum_{i=1}^r \gamma_i \epsilon_{t-i}^2 + \sum_{j=1}^s \psi_j \sigma_{t-j}^{(2)},$$

첫 번째 식은 오차항의 밀도함수가 다음과 같은 혼합정규밀도함수로 주어짐을 의미한다.

$$\sum_{j=1}^n \omega_j \phi(z; \mu_j, \sigma_j^2)$$

여기서 ϕ 는 정규밀도함수이며 벡터 $\omega = (\omega_1, \dots, \omega_n)$ 은 $\omega \in [0, 1]$, $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$ 을 만족시킨다. 즉, 밀도함수가 정규밀도함수의 볼록 결합으로 주어지게 된다.

이 모형에서 중요한 모수(parameter)는 혼합정규분포가 몇 개의 정규분포의 결합인가를 나타내는 n 과 GARCH 모형에서의 모수 r, s 인데, Paolella and Taschini(2008)는 다음과 같이 $n=3, r=s=1$ 인 경우에 SO₂ 배출권 일일 수익률 r_t 를 적절히 모형화함을 보였다.



$$r_t = a_0 + a_1 r_{t-1} + \epsilon_t, \quad \epsilon_t \sim \sum_{j=1}^3 \omega_j \phi(z; \mu_j, \sigma_j^2)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{1t}^2 \\ \sigma_{2t}^2 \\ \sigma_{3t}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{01} \\ \gamma_{02} \\ \gamma_{03} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \gamma_{11} \\ \gamma_{12} \\ 0 \end{bmatrix} \epsilon_{t-1}^2 + \begin{bmatrix} \psi_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \psi_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \psi_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{1,t-1}^2 \\ \sigma_{2,t-1}^2 \\ \sigma_{3,t-1}^2 \end{bmatrix}$$

위의 모형은 다음과 같은 이유로 우리나라 배출권 일일 수익률을 모형화하는데 유용할 것이라고 예상된다. 첫째, 미국의 SO₂ 배출권 일일 수익률과 EU CO₂ 배출권 일일수익률 둘 다 금융시장의 전형적인 특성이라고 할 수 있는 두꺼운 꼬리와 변동성 군집을 보여 주었기 때문에 우리나라의 배출권 역시 이러한 통계적 특성을 가질 것으로 유추할 수 있다. 둘째, 11,000여개가 넘는 발전소와 산업체가 참여하고 있는 EU 배출권 거래제와 비교해 볼 때, 1기 동안 526개 업체만 포함되는 우리나라의 배출권 시장의 유동성은 상당히 낮을 것으로 예상된다. 거래량이 매우 낮아 가격 변동이 0인 날이 많을 것으로 예상되는 바, 우리 배출권 시장의 거래 패턴은 EU 배출권 시장보다 미국의 SO₂ 시장과 더 유사할 것으로 보인다.

5. 결론 및 시사점

우리나라는 이산화탄소 배출 감축 노력의 일환으로 2015년 1월부터 온실가스 배출권 거래제를 시행할 예정이다. 배출권 거래제(혹은 탄소가격제도)는 현재 EU, 미국 캘리포니아주와 캐나다 퀘벡주, 중국의 7개 지방정부, 뉴질랜드 등 일부 지역에서만 실시하고 있으며, 2005년에 시작한 EU를 제외하면, 다른 지역은 시행한지 2~3년 혹은 수개월에 불과하다. 이런 측

면에서 우리나라의 배출권 거래제 도입 결정 및 2015년 시행은 너무 이르다는 일각의 우려는 경청할 만하다. 그러나 배출권 거래제 실시는 이미 국제사회에서 공약한 바 있고, 계획대로 추진하기로 올해 9월 최종 결정한 만큼 이를 취소하는 것은 현실적으로 어려울 것으로 보인다. 따라서 지금 이 단계에서 해야 할 일은 배출권 거래제 도입에 따른 부작용과 시행착오를 최소화할 수 있도록 다른 나라의 사례를 통해 배울 수 있는 교훈을 시장 설계에 최대한 반영하는 것이다.

특히 배출권의 가격은 배출권 거래제에 포함된 기업에게 의사결정시 하나의 요인으로 작용할 것이므로, 배출권 가격에 대한 전망은 중요한 관심사항이 된다. 이런 측면에서 본고에서는 배출권 가격 결정요인에 대한 기존의 연구를 살펴보고 이를 정리하였다. 다른 나라의 거래제는 역사가 짧아 자료가 충분치 않으므로, EU 배출권 거래제에 중점을 두었고, 특히 우리나라도 배출권 거래제를 시행할 예정인 만큼 EU 배출권 거래제 도입 초기를 분석한 연구에 비중을 두고 배출권의 가격 결정요인을 공급측면과 수요측면에서 나누어 살펴보았다.

공급측면에서 가장 중요한 요인은 정부의 정책과 제도이다. 구체적으로 공급요인은 크게 세 가지가 있다. 첫 번째 요소는 배출권의 초기할당, 즉 상한의 수준이다. 두 번째 요소는 이월과 차입의 허용 여부이다. 이 두 요소 모두 정부에 의해 결정된다. 세 번째 요소는 오프셋 사용이다. EU ETS의 경우 CDM 사업을 통해 생산되는 CER의 사용을 허가하였다. 그러나 모든 타입의 오프셋 사용을 허용하는 것은 아니고 사용가능한 오프셋의 질과 양에 일정정도 제약을 두는 것이 일반적이다.

EU의 경우 제도 시행 초기에는 실제 배출량 발표

시기가 배출권 가격에 상당한 영향을 준 것으로 통계적으로 확인되었다. 또한 배출권의 이월과 차입에 대한 제약 여부에 따라 서로 다른 배출권 가격이 공존하게 된 것으로 판명되었다.

수요측면에서의 결정요인은 감축기술, 거시경제 변동, 에너지 가격, 날씨가 있다. 기업은 배출권의 가격과 비교하여 장기적으로 감축기술을 개발·도입할 수도 있고, 단순히 배출권을 구입하여 감축의무를 달성할 수 있다. 거시경제 변동요인도 중요한 요인이다. 경기가 활황이면 생산 활동이 증가하고, 이에 따라 에너지 사용이 많아지게 된다. 에너지 가격 역시 중요한 결정요인이다. 경제에서 가장 큰 CO₂ 배출부분은 에너지·발전부분으로, 에너지 가격 등락에 따라 이 부분의 생산활동 수준이 달라진다. 그리고 온도, 강수량 등의 날씨 요인 역시 전력이나 에너지 수요에 영향을 미치게 되고 이에 따라 배출수준에도 영향을 미치게 된다.

실증적인 분석에 따르면, 에너지 가격 중 석탄과 가스 가격은 배출권 가격에 유의미한 영향을 주지만, 원유 가격은 그렇지 않은 것으로 판명되었다. 이는 단기적으로 이산화탄소 배출을 줄이기 위한 노력은 주로 석탄을 가스로 대체하는 방식으로 이루어지기 때문으로 보인다. 날씨 변수의 영향에 관해서는, 온도의 절대적인 수준 보다는 평년 수준을 벗어나는 이상기온이 냉방이나 난방 수요를 증가시켜 배출권 가격에 영향을 주는 것으로 확인되었다. 또한 강수량은 배출권 가격과 연관이 없는 것으로 보인다.

이렇게 EU 배출권 시장 분석을 통해 얻은 결과가 주는 교훈은 무엇인가?

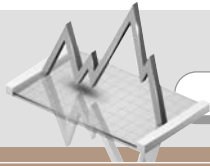
공급측면부터 살펴보자. 우리나라에서도 배출권 상한이나 실제 배출량 발표 시점, 그리고 배출권 이월·

차입 여부는 배출권 공급에 영향을 미칠 것이다. 그리고 배출권 가격의 급격한 변동을 막기 위하여 Hintermann(2010)이 제시한 것처럼 보다 짧은 주기로 실제 배출량을 발표하는 것이 바람직할 것으로 보인다. 그러나 너무 자주 배출량을 측정·기록·확인한다면, 이는 기업에 부담은 주는 것은 물론 정부의 행정적인 비용도 증가시키므로 적절한 발표 주기를 찾는 것은 이러한 트레이드오프(trade-off)를 적절히 고려하여 결정되어야 할 것이다.

수요측면을 살펴보자. 에너지 가격부터 살펴보면, 우리나라에서도 석탄과 가스 가격이 배출권 가격에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 그러나 우리나라의 에너지 시장 사정은 EU와 근본적으로 다르다. EU와 마찬가지로 우리나라 배출권 거래제 주요 참여자는 발전사가 될 것으로 보인다. 그러나 우리나라의 전력시장 구조상 발전사는 정해진 발전량을 공급하여야 하며, 배출권 구매로 인한 전력 발전단가 상승은 소매시장으로 전가되지 못한다. 따라서 우리나라의 석탄 주요 소비자가 화력발전사임을 고려할 때, 석탄과 가스의 상대적 가격 변화가 배출권 가격에 미치는 영향은 EU에서의 그것보다 미미할 가능성이 높다.

날씨 요인의 경우, 우리나라의 최근 기후변화와 이에 따른 냉·난방 수요를 고려해볼 때, 전력수요 증가에 따라 발전사의 배출권 수요도 아울러 증가할 것으로 보인다. 다만 기존의 분석에서는 습도를 고려하지 않았는데, 이는 EU와 우리나라의 기후 차이를 고려해볼 때 우리나라의 경우는 다를 것이라 예상된다. 여름철의 습도 역시 전력수요에 영향을 미치고 이에 따라 배출권 수요에 영향을 미칠 것이기 때문이다.

그리고 전반적인 거시경제 상황은 배출권 가격에 영향을 미칠 것으로 보인다. 특히, 주식시장과 채권시



장에서 거래되는 금융자산의 가격은 탄소시장에서 거래되는 배출권 가격에 어느 정도 영향을 미치는 것으로 연구되고 있다. 또한 금융시장을 포함한 거시경제 전반에 대한 부정적인 외부 충격은 배출권 가격 하락에 영향을 미치고 있으며 경기 변동과 관련하여 배출권 가격은 경기 순응적으로 반응한다고 분석되고 있다. 따라서 수요측면에 배출권 가격의 움직임은 전반적인 거시경제 변수와의 연동과 고려해서 전망할 수 있을 것이다.

마지막으로, Paoletta and Taschini(2008)가 보였던 것처럼 미국의 SO₂ 배출권 일일 수익률과 EU CO₂ 배출권 일일수익률 둘 다 금융시장의 전형적인 특성이라고 할 수 있는 두꺼운 꼬리(fat tail)와 변동성 군집(volatility clustering)을 보여주었다. 우리나라의 배출권 역시 이러한 통계적 특성을 가질 것으로 예상할 수 있다. 또한, 11,500여개가 넘는 발전소와 산업체가 참여하고 일반 투자자의 배출권 거래를 허용하는 EU 배출권 거래제와 비교해 볼 때, 우리나라의 배출권 시장의 유동성은 상당히 낮을 것으로 보인다. 거래량이 매우 낮아 가격 변동이 0인 날이 많을 것으로 예상되는 바, 우리 배출권 시장의 거래 패턴은 EU 배출권 시장보다 참여자가 수백여 기업에 불과하였던 미국의 SO₂ 시장과 더 유사할 것으로 보인다. 따라서 우리나라 배출권 일일 수익률 모형으로 Paoletta and Taschini(2008)가 제시하였던 MixN-GARCH 모형이 적합할 것으로 판단된다.

참고 문헌

〈외국 문헌〉

- Alberola E, Chevallier J. and Cheze B., Price drivers and structural breaks in European carbon prices 2005-07, *Energy Policy* 36, 787-797, 2008
- _____, and Chevallier, J., European carbon prices and banking restrictions: evidence from phase I (2005~2007), *The Energy Journal* 30(3) : 51-80, 2009
- Ait-Sahalia, Y. and Lo, A.W., Nonparametric risk management and implied risk aversion, *Journal of Econometrics* 94, 9-51, 2000
- Bunn, D. W. and, Fezzi C., A vector error correction model of the interactions among gas, electricity and carbon prices: an application to the cases of Germany and United Kingdom, in: F. Gulli (Ed.), *Markets for Carbon and Power Pricing in Europe: Theoretical Issues and Empirical Analyses*, Edward Elgar Publishing, pp. 145-159, 2008
- Chevallier, J., Ielpo F., and Mercier L., Risk Aversion and Institutional Information Disclosure on the European Carbon Market: a Case-Study of the 2006 Compliance Event, *Energy Policy* 37(1) : 15-28, 2009
- _____, A model of carbon price interactions with macroeconomic and energy dynamics, *Energy Economics* 33, 1295-1312, 2011

Daskalakis, G., Psychoyios, D., & Markellos, R.N., Modelling CO₂ emission allowance prices and derivatives : Evidence from the European trading scheme, Journal of Banking and Finance 33(7), 1230–1241, 2009.

Declercq, B., Delarue, E., and D'haeseleer, W., Impact of the economic recession on the European power sector's CO₂ emissions, Energy Policy 39, 1677–1686, 2011

Hintermann, B., Allowance price drivers in the first phase of the EU ETS, Journal of Environmental Economics and Management 59(1), 43–56, 2010

Johansen, S., Estimation and hypothesis testing of cointegration vectors in Gaussian vector autoregressive models, Econometrica 59, 1551–1580, 1991

Kanen, J. L. M., Carbon Trading and Pricing, Environmental Finance Publications, 2006

Mansanet-Bataller, M., Pardo, A. and Valor, E., CO₂ prices, energy and weather, The Energy Journal 28(3), 67–86, 2007

Oberndorfer, U., EU emission allowances and the stock market: evidence from the electricity industry, Ecological Economics 68, 1116–1126, 2009

Paoletta, M., and Taschini, L., An Econometric Analysis of Emission Allowances Prices,

Journal of Banking and Finance 32(1) : 2022–2032, 2008

〈웹사이트〉

http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/cap/allocation/docs/faq_nim_cscf_en.pdf

<http://www.epa.gov/docs/acidrain/ats/cumchart.html>

<http://www.epa.gov/docs/acidrain/effects/tradefx.htm>